

0717723-1

*На правах рукописи*

**ЗАЙНУЛЛИН РАИЛЬ ХАЛИЛОВИЧ**

**БЕЗОПАСНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
СОСУДОВ С ДЕФЕКТАМИ ТИПА «ВМЯТИНА»  
НА ОБЕЧАЙКЕ**

**05.26.04- Промышленная безопасность**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Казань-2000**

Работа выполнена в Казанском государственном технологическом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Перелыгин О.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Кузеев И.Р.  
кандидат технических наук,  
доцент Рачков В.И.

Ведущая организация: НПЦ "Промышленная безопасность",  
г. Москва

Защита диссертации состоится 28 июня 2000 года в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 063.37.05 Казанского государственного технологического университета по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, А-303 (зал заседаний Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан \_\_\_\_ мая 2000 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА  
КФУ



0000947980

Сироткин А.С.

0717723-1



### **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** Оценка остаточного ресурса сосудов и аппаратов, отработавших установленный срок эксплуатации на объектах Госгортехнадзора РФ, проводится по методике, согласно которой основное условие работоспособности оборудования состоит в том, что возникающие в конструкции эквивалентные напряжения не должны превосходить некоторых допускаемых для условий эксплуатации значений. При этом обычно предполагается, что коррозия металла является поверхностной и равномерной, а напряжения оцениваются в бездефектных сечениях.

Очевидно, что эта методика не отражает особенности деформирования конструкций в зоне локального изменения их геометрии. Между тем реальное оборудование содержит исходные и развивающиеся в процессе эксплуатации дефекты, которые оказывают существенное влияние на напряженно-деформированное состояние материала конструкции. Эти дефекты, являясь концентраторами напряжений, могут вызывать резкое локальное изменение напряженно-деформированного состояния сосудов и аппаратов и в большинстве случаев определяют несущую способность оборудования и условия безопасной его эксплуатации.

Для оценки параметров безопасной эксплуатации оборудования на объектах Госгортехнадзора РФ необходимо располагать комплектом методических и программных документов, позволяющих анализировать как напряженно-деформированное состояние (НДС) сосудов и аппаратов в зоне локальных дефектов, так и несущую их способность.

В настоящее время в силу высокой сложности аналитических решений и высокой трудоемкости численных и экспериментальных исследований вопрос о концентрации напряжений в оболочках с вмятинами произвольной формы является практически неизученным. Поэтому следует признать актуальным и отвечающим потребностям промышленной практики исследование, посвященное анализу НДС цилиндрических обечеек с вмятинами произвольной формы и позволяющее оценивать несущую способность таких оболочек.

Работа выполнялась в рамках Программы РТ развития науки по приоритетным направлениям до 2000 года (тема «Математическое

моделирование деформирования тонкостенных конструкций сложной формы и неоднородной структуры») и Госзаказа РТ (темы №№ Ц20-97 и Ц20-99).

Цель работы. Целью работы является разработка комплекта программ, позволяющих в компьютерном комплексе (КК) "ANSYS" анализировать НДС цилиндрических обечаек с вмятинами произвольной формы в упругопластической области, а также разработка методики, позволяющей оценивать несущую способность оболочек с локальными дефектами формы при статическом нагружении.

Научная новизна. Предложена процедура оценки НДС цилиндрических обечаек с вмятинами, позволяющая устанавливать основные закономерности процесса реального нагружения сосудов и аппаратов и выполнять их целенаправленный анализ.

Методами прикладной теории пластичности проанализированы условия возникновения локальных пластических шарниров в оболочечных конструкциях, и предложена оценка несущей способности цилиндрических оболочек с вмятинами при статическом нагружении.\*

Практическая значимость. Практическая значимость работы состоит в том, что на базе КК "ANSYS" разработан комплект программ, позволяющих анализировать НДС цилиндрических оболочек с вмятинами произвольной формы как в области упругих, так и в области пластических деформаций.

По результатам этого анализа на основании предложенной оценки несущей способности цилиндрических оболочек с локальными дефектами формы могут быть получены рекомендации по параметрам безопасной эксплуатации оборудования на объектах, подведомственных Госгортехнадзору РФ.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на итоговой научной конференции 1999 года Казанского научного центра Российской академии наук, на Международной научно-технической конференции "Техно-экономические проблемы промышленного производства" ТЭП-2000

---

\* Автор выражает благодарность доктору физ.-мат. наук, профессору Серазутдинову М.Н., который являлся консультантом по вопросам оценки несущей способности оболочек.



(г. Н- Челны), на научной сессии КГТУ (г. Казань, 2000 г.), а также в ряде организаций, проявивших интерес к результатам работы: КГУ (г. Казань), НИИХиммаш (г. Москва), НТЦ "Промышленная безопасность" (г. Москва) и др.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ и тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 123 наименования, и приложений. Основная часть работы изложена на 135 страницах машинописного текста. Работа содержит 51 рисунок и 6 таблиц.

### *Содержание работы*

Во введении обоснована актуальность темы и формулируется цель работы.

В первой главе приводится краткий анализ публикаций, посвященных методам расчета оболочек сложной геометрии. Отмечается, что наиболее универсальным и эффективным способом расчета НДС оболочек сложной геометрии является метод конечных элементов (МКЭ). Указывается, что среди пакетов прикладных программ и компьютерных комплексов, созданных на основе МКЭ, весьма развитым в плане сервисной части и удобства работы пользователя является КК «ANSYS».

Рассмотрены также некоторые инженерные методы расчета цилиндрических оболочек в зонах, имеющих отклонение от идеальной формы. Показано, что такие отступления от круговой формы, как продольные вмятины, могут быть описаны на основе принципа минимума работы формоизменения, но в этом случае анализу подлежат лишь цилиндрические оболочки с вмятинами, ориентированными вдоль меридиана обечайки.

Проанализированы работы, посвященные экспериментальным и численным исследованиям НДС цилиндрических и сферических резервуаров с круглыми в плане вмятинами, проанализированы также критерии, которые предлагаются в этих работах для оценки статической прочности сосудов и аппаратов, содержащих дефекты и концентраторы напряжений. Показано, что наиболее часто при оценке несущей способности сосудов и аппаратов с локальными дефектами

формы используются критерии, полученные методами теории предельного равновесия, а также деформационные критерии механики разрушения.

В конце главы делаются общие выводы, главный из которых состоит в том, что в настоящее время оценка прочности обечайки с вмятинами при статической нагрузке проводится на основе упрощенного решения задачи о несущей способности оболочки, как бруса единичной ширины и прямоугольного сечения под действием осевой силы и изгибающего момента.

Во второй главе рассматривается конечно-элементное моделирование процесса упругого и упругопластического деформирования цилиндрических оболочек с вмятинами в среде КК «ANSYS». Предложен алгоритм формирования электронного образа цилиндрической оболочки с вмятиной произвольной формы, который реализован на языке параметрического проектирования «APDL».

Основные этапы построения геометрического образа оболочки с вмятиной иллюстрируются на рисунках 1- 4. При этом предполагается, что текущая глубина вмятины  $f$  (вдоль образующей цилиндра) определяется уравнением вида:

$$f = \frac{1}{2} f_0 \left( 1 + \cos \frac{\pi \sqrt{\cos^2 \alpha + d^2 \sin^2 \alpha}}{r_0 d} \right), \quad (1)$$

где  $r_0$  - радиус основания вмятины,  $d$  - длина вмятины, отнесенная к её радиусу,  $f_0$  - глубина вмятины,  $r$  - текущий радиус вмятины,  $\alpha$  - угол между большей полуосью вмятины и образующей цилиндра.

Алгоритм построения электронного образа геометрии объекта исследований учитывает, что в общем случае границы вмятины могут иметь вид деформированного эллипса, а глубину вмятины можно задавать как аналитически, так и по результатам натуральных замеров.

В работе обсуждаются и исследуются проблемы выбора основного расчетного конечного элемента и дискретизации тонкостенной изотропной цилиндрической оболочки с вмятиной, находящейся под действием равномерного внутреннего давления. На рис. 5 и рис. 6



*Рис.1. Пересечение цилиндрических оболочек, определяющих границу вмятины*



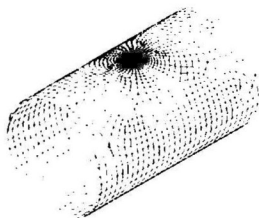
*Рис.2. Оболочка с отверстием и системой определяющих вмятину точек*



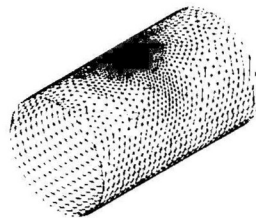
*Рис.3. Оболочка с отверстием и сплайнами, определяющими форму вмятины*



*Рис.4. Оболочка с вмятиной.*



*Рис.5. Дискретизация оболочки четырехугольными элементами*



*Рис.6. Дискретизация оболочки треугольными элементами*

Таблица 1

*Зависимость величины интенсивности нормальных напряжений от числа узлов дискретизации конструкции (в МПа) для разных вариантов дискретизации*

Неравномерная сетка оптимизированных по форме конечных элементов		Равномерная сетка оптимизированных по форме конечных элементов		Неравномерная сетка не оптимизированных по форме конечных элементов	
Число узлов	$\sigma_i (*10^{-3})$	Число узлов	$\sigma_i (*10^{-3})$	Число узлов	$\sigma_i (*10^{-3})$
96	0.118	93	0.096	93	0.118
359	0.192	332	0.154	321	0.194
737	0.212	721	0.188	689	0.218
1352	0.218	1299	0.196	1283	0.217
2151	0.224	2100	0.204	2096	0.224

Таблица 2

*Зависимость величины интенсивности нормальных напряжений от числа узлов дискретизации конструкции (в МПа) для разных типов конечных элементов*

Линейный треугольный конечный элемент		Линейный четырехугольный конечный элемент		Квадратичный четырехугольный конечный элемент	
Число узлов	$\sigma_i (*10^{-3})$	Число узлов	$\sigma_i (*10^{-3})$	Число узлов	$\sigma_i (*10^{-3})$
133	0.086	96	0.118		
377	0.182	359	0.192	301	0.281
819	0.204	737	0.212	1016	0.238
1489	0.216	1352	0.218		
2301	0.218	2151	0.224	2151	0.232

приведены схемы дискретизации оболочки четырехугольными и треугольными конечными элементами, соответственно.

Проведен анализ точности и сходимости конечно-элементного расчета на прочность цилиндрической оболочки с вмятиной для различных типов дискретизирующих оболочку конечных элементов, и на основе линейного четырехугольного конечного элемента проведены исследования по выбору конечно-элементной схемы разбиения конструкции при анализе НДС оболочек с вмятинами.

Результаты этих исследований представлены в таблицах 1, 2. Для проведения вычислительных экспериментов были выбраны следующие геометрические размеры оболочки с вмятиной: внутренний радиус оболочки  $R = 0.6 м$ ; длина оболочки  $2l = 2м$ ;  $s = 0.006 м$ ;  $r_e = 0.15 м$ ;  $d = 1$ ;  $f_e = 0.009 м$  - глубина вмятины;  $l = 1 м$  - расстояние от центра вмятины до торца оболочки. Модуль упругости материала оболочки  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа и коэффициент Пуассона  $\mu = 0.28$  считались заданными. Оболочка нагружалась равномерным внутренним давлением интенсивностью  $p = 0.9$  МПа.

По результатам численных исследований, приведенных в таблицах 1, 2, определена оптимальная схема дискретизации и тип расчетного конечного элемента для задачи упругопластического деформирования цилиндрической оболочки с дефектами типа «вмятина».

Как и следовало ожидать, из результатов расчетов следует, что линейный треугольный конечный элемент даст менее точные результаты, чем соответствующий четырехугольный при прочих равных условиях. Наиболее точным следует признать первый вариант дискретизации. Второй вариант дает сильно заниженные результаты, а третий практически мало отличается от первого, но его использование требует большего ресурса РС.

В третьей главе рассмотрен вывод критерия для оценки несущей способности цилиндрических оболочек с вмятинами. Критерий предполагает появление в оболочках локальных пластических шарниров.

Поскольку НДС оболочек существенно отличается от соответствующего состояния стержней, соотношения, которые определяют условия возникновения в оболочечных конструкциях локальных пластических шарниров могут быть записаны следующим образом

$$F_T(\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_T) = 0 \quad (-s/2 \leq z \leq s/2). \quad (2)$$

Здесь  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  - нормальные и касательные напряжения, действующие в сечениях оболочки,  $\sigma_T$  - предел текучести,  $z$  - координаты точек по нормали к срединной её поверхности оболочки.

При использовании условия пластичности Хубера-Мизеса равенство (2) может быть представлено в виде:

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 = \sigma_T^2 \quad (-s/2 \leq z \leq s/2). \quad (3)$$

Поскольку с возникновением же пластических деформаций, закон изменения  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  по толщине оболочки неизвестен, постулировалось, что эти напряжения по  $z$  можно аппроксимировать функцией вида:

$$\sigma_x = H_0(z, \ell_x) k_x \sigma_T, \sigma_y = H_0(z, \ell_y) k_y \sigma_T, \\ \tau_{xy} = H(z, \ell_{xy}) k_{xy} \sigma_T \quad (4)$$

Здесь  $k_x, k_y, k_{xy}$  - некоторые коэффициенты,  $H_0(z, \ell)$  - кусочно-постоянная функция, знак которой зависит от  $\ell$ , а модуль равен единице (рис. 7).

С учетом (3) и (4), а также известных соотношений между усилиями  $N_x, N_y, N_{xy}$ , моментами  $M_x, M_y, M_{xy}$  и напряжениями, условие (2) после преобразований принимает следующий вид:

$$8M_x^2 + 4z_x^* M_x \sqrt{4M_x^2 + s^2 N_x^2} + s^2 N_x^2 + \\ + 8M_y^2 + 4z_y^* M_y \sqrt{4M_y^2 + s^2 N_y^2} + s^2 N_y^2 + \\ + 24M_{xy}^2 + 12z_{xy}^* M_{xy} \sqrt{4M_{xy}^2 + s^2 N_{xy}^2} + 3s^2 N_{xy}^2 - \\ - L_{xy} \left( 2M_x + z_x^* \sqrt{4M_x^2 + s^2 N_x^2} \right) \left( 2M_y + z_y^* \sqrt{4M_y^2 + s^2 N_y^2} \right) = \sigma_T^2 s^4 \quad (5)$$

$$\text{Здесь } z_x^* = \text{sgn}(M_x), \quad z_y^* = \text{sgn}(M_y), \quad z_{xy}^* = \text{sgn}(N_{xy});$$

$\text{sgn}(M)$  - функция знака;  $L_{xy} = (s - 2|\ell_x - \ell_y|)/s$ ;

$$\begin{aligned}\ell_x &= -s^2 N_x / (4M_x + 2z_x^* \sqrt{4M_x^2 + s^2 N_x^2}); \\ \ell_y &= -s^2 N_y / (4M_y + 2z_y^* \sqrt{4M_y^2 + s^2 N_y^2}).\end{aligned}$$

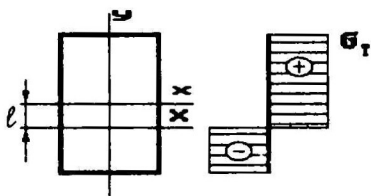


Рис. 7.

В работе показано, что вместо усилий и моментов в расчетах и в записи уравнения (5) можно использовать величины изгибных и мембранных напряжений, и предложен алгоритм нахождения по результатам исследования НДС оболочек в упругой области внутреннего давления  $p_{nl}$ , при котором в оболочке возникает локальный пластический шарнир.

Показано, что в этом случае:

$$p_{nl} = \sigma_T^2 / \sqrt{F_{2T}(\sigma_x^{lm}, \sigma_y^{lm}, \tau_{xy}^{lm}, \sigma_x^{lu}, \sigma_y^{lu}, \tau_{xy}^{lu})} \quad (6)$$

Здесь  $F_{2T}(\sigma_x^{lm}, \sigma_y^{lm}, \tau_{xy}^{lm}, \sigma_x^{lu}, \sigma_y^{lu}, \tau_{xy}^{lu}) =$

$$\begin{aligned}& \frac{2}{9}(\sigma_x^{lu})^2 + \frac{2}{3}z_x^* \sigma_x^{lu} \sqrt{(\sigma_x^{lu})^2 / 9 + (\sigma_x^{lm})^2} + (\sigma_x^{lm})^2 + \\& + \frac{2}{9}(\sigma_y^{lu})^2 + \frac{2}{3}z_y^* \sigma_y^{lu} \sqrt{(\sigma_y^{lu})^2 / 9 + (\sigma_y^{lm})^2} + (\sigma_y^{lm})^2 + \\& + \frac{1}{3}(\tau_{xy}^{lu})^2 + 2z_{xy}^* \tau_{xy}^{lu} \sqrt{(\tau_{xy}^{lu})^2 / 9 + (\tau_{xy}^{lm})^2} + 3(\tau_{xy}^{lm})^2 - \\& - L_{xy} \left( \sigma_x^{lu} / 3 + z_x^* \sqrt{(\sigma_x^{lu})^2 / 9 + (\sigma_x^{lm})^2} \right) \left( \sigma_y^{lu} + z_y^* \sqrt{(\sigma_y^{lu})^2 / 9 + (\sigma_y^{lm})^2} \right).\end{aligned}$$

При вычислении напряжений предполагается, что:

$$\begin{aligned}\sigma_x^m &= p_{nl} \sigma_x^{lm}, & \sigma_y^m &= p_{nl} \sigma_y^{lm}, & \tau_{xy}^m &= p_{nl} \tau_{xy}^{lm}, \\ \sigma_x^n &= p_{nl} \sigma_x^{ln}, & \sigma_y^n &= p_{nl} \sigma_y^{ln}, & \tau_{xy}^n &= p_{nl} \tau_{xy}^{ln}.\end{aligned}$$

Здесь  $\sigma_x^{lm}$ ,  $\sigma_y^{lm}$ ,  $\tau_{xy}^{lm}$  - мембранные, а  $\sigma_x^{ln}$ ,  $\sigma_y^{ln}$ ,  $\tau_{xy}^{ln}$  - изгибные составляющие напряжений от единичной нагрузки, найденные по результатам исследования НДС оболочек в упругой области.

В диссертационной работе представлены также результаты расчетов предельных нагрузок для некоторых оболочечных конструкций по предлагаемому критерию (5). Показано, что в частных случаях, полученные с его использованием результаты совпадают с известными в литературе величинами и соотношениями. Установлено, что чем резче выражен в оболочках краевой эффект, тем значительней разница между  $p_{nl}$  и  $p^*$  - несущей способности, полученной из решения упругой задачи, из чего можно сделать заключение, что наиболее эффективно применение разработанного критерия при расчете конструкций, имеющих локальные дефекты формы: вмятины, выпучины, увод и нестыковку кромок и т. д.

В четвертой главе проведено сравнение результатов расчета цилиндрических оболочек с круглыми в плане вмятинами и литературных данных по этому вопросу, исследовано влияние глубины, формы, ориентации вмятины, радиуса ее основания на НДС оболочек, а также проведен сравнительный анализ упругопластического деформирования цилиндрических оболочек с вмятинами.

Для оценки точности и достоверности результатов, получаемых на основе КК "ANSYS", в работе проводится их сопоставление с экспериментальными данными и результатами расчетов, выполненных с применением различных конечно-элементных пакетов. Поэтому параметры геометрических моделей и условий их нагружения в выполненных исследованиях соответствовали параметрам и условиям, описанным в работах [1,2]\*. Изменение глубины вмятины  $f_0$  вдоль ее текущего радиуса  $r$  аппроксимировалось уравнением (1). Размеры цилиндрических оболочек и параметры вмятин варьировались в пределах  $R/s = 50 - 200$ ,  $f/s = 0,25 - 2$ ,  $r_0 = R/12 - R/3$ .



Таблица 3

*Результаты численных исследований коэффициентов концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  в цилиндрических оболочках с круглыми в плане вмятинами*

$R, \text{мм}$	$s, \text{мм}$	$P, \text{МПа}$	$r_a, \text{мм}$	$f, \text{мм}$	$\alpha_\sigma$ ANS.	$\alpha_\sigma^*$	$\alpha_\sigma^{**}$	$\alpha_\sigma^{***}$
450	6	0,9	100	9	3,27	3,77	3,67	3,20
800	14	1,5	133	21	2,92	3,38	3,67	2,95
1000	20	1,7	167	30	2,88	3,32	3,67	3,07
1600	18	2,0	350	18	2,94	2,78	2,18	3,30
1200	10	0.6	167	30	3.70	5.19	11	4.01

Здесь  $\alpha_\sigma^*$  - получены из [1,2]\*,  $\alpha_\sigma^{**}$  - по РД 26-6-87, а  $\alpha_\sigma^{***}$  - получены по программе, разработанной на кафедре Сопромата КГТУ.

Исследования проводились на обечайках из стали 12Х18Н10Т и из углеродистой стали ВСтЗсп. Некоторые результаты численных исследований коэффициентов концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$  в цилиндрических оболочках с круглыми в плане вмятинами представлены в таблице 3.

Как следует из таблицы, результаты анализа НДС цилиндрических оболочек с круглыми в плане вмятинами, полученные с использованием КК «ANSYS» хорошо согласуются с результатами, полученными по различным пакетам МКЭ, и с данными экспериментальных наблюдений. Это позволяет сделать заключение, что КК «ANSYS» может быть использован для анализа НДС оболочек любой геометрии с вмятинами и выпучинами произвольной формы.

\*1. Лихман В.В., Копысицкая Л.Н., Муратов В.М. Концентрация напряжений в резервуарах с локальными несовершенствами формы// Химическое и нефтяное машиностроение, 1992. №6. С.22-24.

2.Мухин В.Н., Эльманович В.И., Расчетная и экспериментальная оценка влияния локальных вмятин на прочность корпусов сосудов и аппаратов// Хим. и нефтяное машиностроение, 1991. №6. С.24-26.

В дальнейшем исследовано влияние размеров и ориентации вмятин на НДС цилиндрических оболочек и показано, что построенная в исследовании расчетная процедура позволяет эффективно решать задачи анализа упругопластического деформирования оболочек с вмятинами. Численные исследования проводились на цилиндрических оболочках из стали 12Х18Н10Т. Рассматривались эллиптические в плане вмятины, равноудаленные от торцов оболочки, при этом  $d$  - отношение полуоси, ориентированной вдоль меридиана, к полуоси, ориентированной по касательной к оболочке изменялось от 1 до 3.

В ходе проведения численного эксперимента исследовалось влияние глубины вмятины  $f_e$  (от 0.0011 м до 0.0036 м), размера малой полуоси контура вмятины  $r_e$  (от 0.0375 м до 0.300 мм) и угла ориентации вмятины относительно образующей оболочки  $\alpha$  (от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ ). Характер изменения глубины вмятины определялся уравнением (1).

На рис.8 и 9 приведены результаты численного исследования НДС оболочек радиусом  $R=0.6$  м при толщине стенки обечайки  $s=0.006$  м и длине  $l=2$  м. Обечайка нагружалась внутренним давлением  $p=0.3$  МПа. При этом напряжения в бездефектной зоне оболочки составляли 26.7 МПа.

Следует отметить, что с уменьшением глубины вмятины (при постоянном радиусе её контура) решение стремится к случаю бездефектного цилиндра, а увеличение глубины вмятины приводит к росту эквивалентных напряжений до некоторого предела, после чего начинается их снижение. При этом зона максимальных напряжений смещается от середины вмятины к её краям, а в центре вмятины даже наблюдается разгрузка, что согласуется с данными других исследователей. Подобную картину можно наблюдать и при фиксированной глубине вмятины, если начинает увеличиваться радиус ее основания. В диссертационной работе предлагается также расчетная процедура, позволяющая эффективно решать задачи анализа упругопластического деформирования оболочек с вмятинами и оценивать малоцикловую прочность цилиндрических обечаек с локальными дефектами формы.

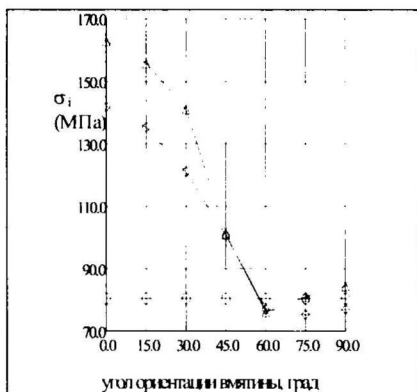


Рис.8. Влияние угла ориентации вмятины на максимальные эквивалентные напряжения в ней

О -  $f=9$  мм,  $r_n=150$ ,  $d=1$ ;  
 $\diamond$  -  $f=9$  мм,  $r_n=150$ ,  $d=2$ ;  
 $\Delta$  -  $f=9$  мм,  $r_n=150$ ,  $d=3$ .

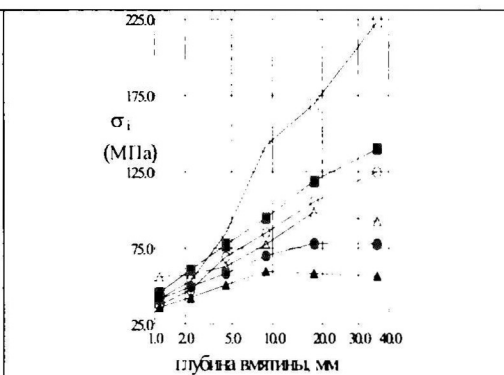


Рис.9. Влияние глубины вмятины на максимальные эквивалентные напряжения в ней

О -  $r_n=150$  мм,  $d=1$ ; 1 -  $r_n=150$  мм,  $d=2$ ,  $\alpha=0^\circ$ ;  
 $\Delta$  -  $r_n=150$  мм,  $d=2$ ,  $\alpha=90^\circ$ ;  
 $= - r_n=37.5$  мм,  $d=1$ ;  $< - r_n=37.5$  мм,  $d=2$ ,  $\alpha=0^\circ$ ;  
 $\blacktriangle$  -  $r_n=37.5$  мм,  $d=2$ ,  $\alpha=90^\circ$ .

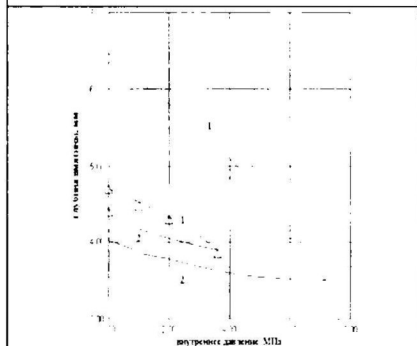


Рис.10. Изменение текущего размера глубины вмятины от внутреннего давления  
 -- кривые исходного нагружения (1) и разгрузки (2) согласно [1]

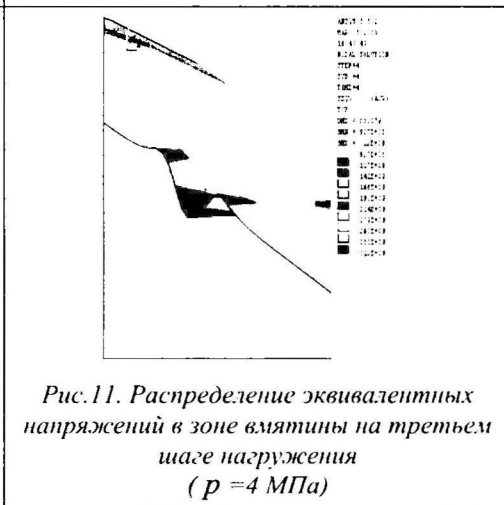


Рис.11. Распределение эквивалентных напряжений в зоне вмятины на третьем шаге нагружения ( $p = 4$  МПа)

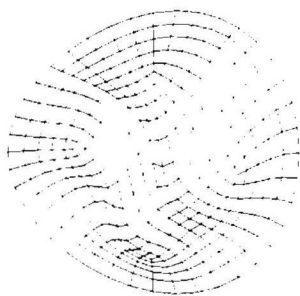


Рис.12. Дискретизация вмятины сложной формы.

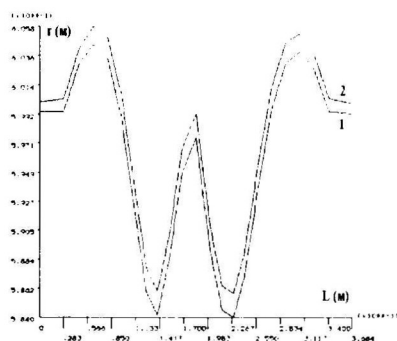


Рис.13. Глубина вмятины до (1) и после (2) нагружения для оболочки, форма вмятины которой представлена на рис.12

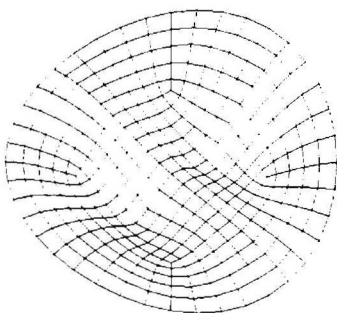


Рис. 14. Дискретизация вмятины с бугром в середине.

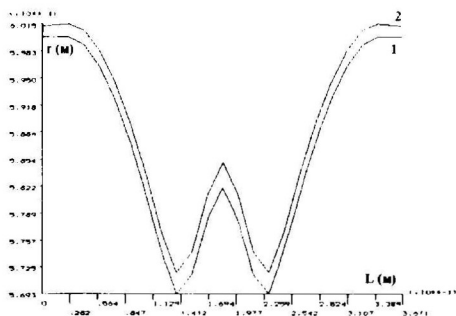


Рис.15. Глубина вмятины до (1) и после (2) нагружения для оболочки, форма вмятины которой представлена на рис.14.

Упругопластический расчет оболочки с вмятинами проводился для сосудов из стали 12X18H10T со следующими геометрическими параметрами:  $R=0.125$  м,  $s=0.00125$  м,  $l=0.500$  м. Рассматривались круглые в плане вмятины, характер изменения глубины которых, определялся уравнением (1). Торцы цилиндрической оболочки шарнирно закреплялись, сама оболочка ступенчато нагружалась внутренним давлением до некоторой величины  $p$ , после чего разгружалась. На рисунке 10 показано изменение глубины вмятины в процессе нагружения оболочки внутренним давлением и при последующей разгрузке. Для сравнения приведены экспериментальные результаты, заимствованные из [1].

Глубина вмятины  $f_0$  на оболочках принималась равной  $0.0064$  м и  $0.0047$  м, максимальное внутреннее давление  $p$  равнялось  $7.2$  МПа и  $3.6$  МПа, соответственно. Как следует из результатов расчетов, предложенная расчетная процедура позволяет эффективно решать задачи анализа упругого деформирования оболочек с вмятинами и может быть использована для оценки малоциклового прочностного цилиндрических обечаек с локальными дефектами формы.

В работе также предложена расчетная процедура анализа НДС оболочек с вмятинами сложного профиля, и проведены численные исследования цилиндрических оболочек вмятинами различной топографии. Для примера, на рис.12 и рис.14 представлена дискретизация вмятины сложного профиля и глубина вмятины до (1) и после (2) нагружения (рис.13 и рис.15).

Приведенные в работе примеры расчета вмятин убедительно свидетельствуют, что разработанная программа анализа НДС оболочек позволяет эффективно моделировать и рассчитывать цилиндрические обечайки с вмятинами сложного профиля.

### *Основные выводы и результаты*

1. Анализ литературных данных показал, что в настоящее время отсутствуют работы, посвященные экспериментальным и численным исследованиям НДС оболочек с вмятинами сложной формы. Этот же анализ показал, что для оценки статической прочности сосудов и аппаратов с вмятинами рекомендуется упрощенное решение задачи о несущей способности оболочки, как бруса единичной ширины и прямоугольного сечения.

2. Предложен электронный образ цилиндрической оболочки с вмятинами в среде КК «ANSYS». Разработана программа на языке автоматического проектирования «APDL», реализующая топографию вмятины сколь угодно сложной формы.

3. Разработана процедура решения статической задачи упруго деформирования цилиндрической оболочки с вмятинами в среде КК «ANSYS». Проведены численные исследования, позволяющие определить оптимальную схему дискретизации и тип расчетного конечного элемента для задачи упругопластического деформирования цилиндрической оболочки с дефектами типа «вмятина».

4. Предложен критерий оценки несущей способности  $P_m$  для оболочки с локальными дефектами, который определяет условия возникновения в ней локальных пластических шарниров. Показано, что чем резче выражен в оболочках краевой эффект, тем значительней разница между  $P_m$  и  $P'$  - несущей способности, полученной из решения упругой задачи. Из этого делается заключение, что наиболее эффективно применение разработанного критерия при расчете конструкций, имеющих локальные дефекты формы: вмятины, увод и нестыковку кромок и т. д.

5. Показано, что результаты анализа НДС цилиндрических оболочек с круглыми в плане вмятинами, полученные с использованием КК «ANSYS» хорошо согласуются с результатами, полученными по различным пакетам МКЭ, и с данными экспериментальных наблюдений. Это позволяет сделать заключение, что КК «ANSYS» может быть использован для анализа НДС оболочек любой геометрии с вмятинами и выпучинами произвольной формы.

6. Исследовано влияние размеров и ориентации вмятин на НДС цилиндрических оболочек. Установлено, что при продольной ориентации эквивалентные напряжения в зоне вмятины могут быть значительно выше, чем в тех же условиях нагружения при поперечной ее ориентации. Показано, с увеличением глубины вмятины сначала происходит рост эквивалентных напряжений в её центре, но при дальнейшем увеличении глубины вмятины зона максимальных напряжений смещается от центра вмятины к её краям, а в центре вмятины начинается даже разгрузка.

7. Проведён сравнительный анализ упругопластического деформирования оболочек с вмятинами, отмечено хорошее совпадение полученных при этом результатов с экспериментальными данными.

8. Показано, что разработанная в среде КК «ANSYS» процедура анализа НДС оболочек с вмятинами произвольной формы, позволяет успешно решать задачи прочностного анализа сосудов и аппаратов в условиях статического и малоциклового нагружения при определении параметров их безопасной эксплуатации.

### **Обозначения**

$d$  - длина вмятины, отнесенная к её диаметру;  $f$  - глубина вмятины,  $M$  - изгибающий момент,  $N$  - нормальное усилие,  $p$  - внутреннее избыточное давление,  $R$  - внутренний радиус оболочки,  $r_0$  - радиус основания вмятины,  $r$  - текущий радиус вмятины,  $s$  - толщина оболочки,  $x, y, z$  - координаты,  $\alpha$  - угол между осью вмятины и образующей цилиндра,  $\sigma$  - нормальное напряжение,  $\tau$  - касательное напряжение,  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  - напряжения, действующие во взаимно перпендикулярных сечениях оболочки,  $\sigma_x^M, \sigma_y^M, \tau_{xy}^M$  - мембранные составляющие напряжений,  $\sigma_x^H, \sigma_y^H, \tau_{xy}^H$  - изгибные составляющие напряжений,  $\sigma_T$  - минимальное значение предела текучести при расчетной температуре.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Серазутдинов М.Н., Зайнуллин Р.Х. Перелыгин О.А. Об условии прочности оболочки при возникновении пластических деформаций.// Вестник Казанского технологического университета, 1999. №1-2. С. 47-52.

2. Перелыгин О.А Серазутдинов М.Н., Зайнуллин Р.Х., Фокин Д.А. Исследование напряжённо-деформированного состояния цилиндрических оболочек с локальными несовершенствами формы.// Вестник Казанского технологического университета, 1999. №1-2. С. 58-61.

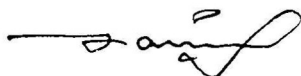
3. Серазутдинов М.Н. Перелыгин О.А., Зайнуллин Р.Х., Прочность оболочечных конструкций при возникновении пластических деформаций.// Научная сессия КГТУ. Аннотация сообщений. Казань. 2000. С. 86.

4. Серазутдинов М.Н., Зайнуллин Р.Х., Перелыгин О.А Условие прочности оболочки при пластических деформациях.// Техничко-эко-

номические проблемы промышленного производства: Тезисы докладов. Н.Челны. 2000. С. 40.

5. Перелыгин О.А., Сопин В.Ф., Зайнуллин Р.Х., Бережной Д.В. Результаты исследования оболочек с вмятинами произвольной формы. // Вестник Казанского технологического университета, 2000. №1. С. 55-60.

Соискатель



Р.Х. Зайнуллин



---

Отпечатано в типографии ОАО «Карпол»  
420095, Казань, ул. Восстания, 100  
Тираж 100 экз. Заказ 487



200